

Технология направленного формирования внутренней структуры литого металла

Разработана и испытана технология рафинирования и раскисления металла на начальной стадии доводки на УКП порошковой проволокой с наполнителем из смеси гранулированного алюминия и металлического кальция. Технология обеспечивает раннее формирование внутренней структуры литого металла со снижением в 2-6 раз количества неметаллических включений и образованием дендритной структуры с увеличением площади межосных участков и объема кристаллизующейся в них жидкости; улучшение технологических показателей доводки стали (снижение окисленности металла и шлака, увеличение скорости и степени десульфурации металла); повышение качества готового проката.

Ключевые слова: внутренняя структура, литой металл, неметаллические включения, порошковая проволока, алюмокальциевый наполнитель, раскисление, дендритная структура, межосные участки

Введение

Направленное формирование внутренней структуры литого металла (количества и формы неметаллических включений, микроструктуры) в современных условиях сталеплавильного производства осуществляется, как правило, на завершающей стадии доводки стали на установках доводки металла (УДМ) или ковш-печь (УКП) и при разливке на установке непрерывной разливки стали (УНРС).

Для обеспечения эффективного снижения количества неметаллических включений, получения их глобулярной формы и благоприятной микроструктуры (дендритной и действительной) используются различные раскисляющие, микролегирующие и модифицирующие добавки. Одним из основных компонентов и методов является использование (при обработке металла на УКП) порошковой проволоки (ПП) с различными наполнителями.

Изменение внутренней структуры литого металла в период непосредственно перед и во время формирования твердой фазы стали на УНРС в промежуток времени от конца обработки (доводки) на УКП до разливки, на наш взгляд, не всегда обеспечивает достаточный уровень качества готового проката. Одним из путей улучшения условий для надежного обеспечения конечных показателей качества является поэтапное формирование структуры литого металла, начатое с ранней стадии его доводки по температуре и химическому составу на УКП.

Известна технология использования порошковой проволоки с наполнителем из алюминия и кальция. Данная проволока в основном применяется при выплавке бескремнистых марок стали взамен порошковой проволоки с силикокальцием [1]. Такой вариант технологии позволяет совместить процессы модифицирования и микролегирования стали кальцием и корректировку содержания алюминия. Особенностью алюмокальциевой проволоки является то, что в качестве наполнителя используется материал, состоящий из двух компонентов, причем температура плавления обоих компонентов ниже температуры жидкой стали (кальций – 851 °С, алюминий – 657 °С) [2].

Важным является то, что в процессе входа в рас-

плавленный металл в момент расплавления металлической оболочки внутри ее должна быть сформирована жидкая лигатура. Это достигается путем установления скорости ввода порошковой проволоки. При взаимодействии лигатуры с жидким металлом образуются различные кальций-алюминиевые соединения. В системе **Ca-Al** имеется несколько химических соединений, при этом конгруэнтно плавится при температуре 1079 °С только CaAl_2 [3, 4]. Сплав CaAl_2 должен переходить в парообразное состояние также конгруэнтно.

Нами предложен новый подход к использованию порошковой проволоки с алюмокальциевым наполнителем. Разработана и испытана технология использования порошковой проволоки с различным соотношением кальция и алюминия для микролегирования и раскисления металла и шлака на УКП в начальной стадии его обработки. Сделан исследовательский шаг к изучению возможности управления внутренней структурой металла в начале доводки для обеспечения необходимых условий формирования более высоких качественных показателей конечного металлопродукта.

Эта работа является продолжением (или совершенствованием) ранее разработанной новой технологии раскисления стали на УКП [5] с измененным порядком раскисления – без подачи вторичного алюминия в ковш на выпуске из сталеплавильного агрегата, вводом алюминиевой катанки в начале обработки, использованием 45%-го FeSi вместо 65%-го. Поэтому в настоящей работе результаты разрабатываемой технологии сравнивали с данными плавов текущего производства по приведенной выше технологии.

Результаты испытаний

Методические особенности проведения испытаний. Основные технические данные порошковой проволоки с весовым соотношением алюминия и кальция 60/40, показавшей наилучшие технологические показатели при испытаниях, приведены в табл. 1.

Одной из особенностей при проведении испытаний являлось то, что на выпуске полупродукта из мартеновской печи в ковш совместно с ферросплавами

Технические данные порошковой проволоки

Тип порошковой проволоки	Массовая доля базовых элементов в наполнителе, %		Масса наполнителя в 1 п/метре проволоки, кг	Диаметр проволоки, мм
	Al	Ca		
ПП-13Б-1.20-76-50	60	40	0,126	13

присаживали 800 ± 50 кг твердой шлакообразующей смеси (ТШС), состоящей из 600 кг извести и 200 кг алюмофлюса. При использовании этой смеси вторичный алюминий в чушках для раскисления полупродукта не применяли.

При обработке металла на УКП перед началом дугового нагрева в течение первых 1-3 мин производили присадку в ковш 50-100 кг алюмофлюса. Через 3-5 мин после начала обработки в металл вводили алюмокальциевую порошковую проволоку из расчета получения в металле 0,005-0,008 % Al.

Скорость ввода порошковой проволоки зависела от температуры металла в сталеразливочном ковше [1]. В табл. 2 приведены данные по скорости ввода проволоки в зависимости от температуры металла.

По ходу обработки на УКП отбирали пробы металла и шлака на химический анализ для изучения особенностей формирования металла и шлака при использовании лигатуры из алюминия и кальция. Пробы на содержание газов (кислород, азот) брали по ходу обработки металла на УКП и разливки на УНРС. Для изучения особенностей микроструктуры металла, количества и видов неметаллических включений по ходу доводки на УКП и разливки на УНРС отбирали специальные пробы.

Технологические показатели опытных плавков. В основу исследований положено предположение о том, что ввод смеси сильных раскислителя и модификатора (алюминия и кальция) в начале обработки на УКП в нераскисленный алюминием полупродукт при выпуске из сталеплавильного агрегата обеспечит более глубокое раскисление металла и шлака, изменение внутренней структуры металла, количества и формы неметаллических включений. Это должно привести к улучшению условий десульфурации металла, снижению расхода раскисляющих материалов, увеличению степени усвоения элементов раскислителей и модификатора, увеличению уровня свойств готового проката.

Испытания алюмокальциевой порошковой проволоки проведены на стали марок S235JR, S235J2G3, BVA и 09Г2С.

Показатели исследованной технологии раскисления стали на плавках с использованием порошковой проволоки с алюмокальциевым наполнителем в соотношении алюминия и кальция 60/40 представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов показывает, что для всех исследованных марок стали наблюдаются общие закономерности: усвоение алюминия из алюмокальциевой проволоки в среднем на 5,3-20,3 % выше, чем из алюминиевой катанки; расход алюмофлюса на опытных плавках ниже на 26-60 кг абс. на плавку, или на 0,18-0,4 кг/т стали; по ходу плавки скорость десульфурации металла на $(0,8-2,1) \cdot 10^{-4}$ %/мин, а степень десульфурации на 0,1-3,0 % выше, чем при обычной технологии (за весь период обработки степень десульфурации металла для всех вариантов технологии выше на 0,9-3,9 %); стабильно во всех группах плавков снижается расход порошковой проволоки с силикокальцием. Вместе с тем, содержание кальция по вводу более высокое, и в конечном итоге его усвоение по вводу на 0,8-3,4 % выше на опытных плавках.

Более высокое усвоение алюминия из алюмокальциевой порошковой проволоки можно объяснить комплексным вводом двух раскислителей, алюминия и кальция.

Лигатура из смеси алюминия и кальция – эффективный раскислитель как металла, так и шлака. В табл. 4 приведены результаты определения содержания кислорода в металле на опытных и сравнительных плавках в динамике. Для сравнения взяты также данные, полученные ранее при использовании вторичного чушкового алюминия в ковше на выпуске из сталеплавильного агрегата и 65%-го FeSi на УКП при доводке стали.

Видно, что наиболее низкое содержание кислорода в металле наблюдается при использовании для предварительного раскисления в самом начале обработки порошковой проволоки со смесью алюминия и кальция. Важно отметить, что содержание кислорода в металле в период обработки на УКП на опытных плавках колеблется в меньших пределах, что свидетельствует о более стабильной окисленности металла. Содержание кислорода (ppm), к примеру, в середине обработки на опытных плавках находится в пределах 34-52 и в среднем составляет 44, тогда как на сравнительных – в пределах 36-56 и 37-82, то есть в среднем 46 и 50.

В табл. 5 приведены данные о химическом составе шлаков, отобранных по ходу обработки опытных плавков. Из представленных данных видно, что после ввода алюмокальциевой порошковой проволоки

Таблица 2

Скорость ввода порошковой проволоки

Температура жидкой стали, °С	1530	1540	1550	1560	1570	1580	1590	1600
Скорость ввода порошковой проволоки, м/мин	110	120	130	140	150	160	170	185

Таблица 3

Технологические показатели плавок с использованием порошковой проволоки с наполнителем из алюминия и кальция в соотношении 60/40

Марка стали	Содержание на выпуске из мартеновской печи, %		Расход, м		Усвоение, %	Присадки, кг		2-я проба, % (середина обработки)		Скорость десульфурации	Степень десульфурации	Расход SiCa, м	Конечная проба, %			За период обработки							
	C	S	AlCa	Al катанка		Al	CaO	Al-флюс	S				Al	1-2, %/мин	1-2, %	S	Al	Ca	Скорость десульфурации, %/мин	степень десульфурации, %	усвоение Ca, %		
					мин.					макс.	сред.	мин.										макс.	сред.
S235JR	опытные 14 плавок																						
	мин.	0,06	0,038	137	-	64	0,038	0,005	38,9	300	100	0,026	0,005	0,00011	4,2	157	0,022	0,01	0,0014	144,7	0,00034	25,5	16,2
	макс.	0,17	0,085	200	-	84	0,078	0,01	95,2	1100	645	0,055	0,006	0,00153	32,0	179	0,036	0,012	0,0026	165,6	0,0130	55,1	28,8
сред.	0,13	0,059	156	-	77	0,055	0,007	70,8	614	356	0,041	0,005	0,00077	24,7	169	0,032	0,011	0,0019	155,8	0,00068	40,6	20,7	
S235J2G3, B/A	сравнительные 19 плавок																						
	мин.	0,06	0,038	-	98	30	0,038	0,005	36,7	200	150	0,027	0,005	0,00024	8,5	168	0,019	0,009	0,0015	135,5	0,00027	17,5	15,2
	макс.	0,15	0,062	-	100	80	0,062	0,012	88,8	1100	750	0,046	0,006	0,00144	44,9	180	0,035	0,012	0,0027	167,1	0,00138	60,3	30,3
сред.	0,12	0,051	-	99	70	0,048	0,007	50,5	632	416	0,036	0,005	0,00069	24,6	175	0,028	0,011	0,0019	152,8	0,00065	39,7	19,9	
S235J2G3, B/A	опытные 16 плавок																						
	мин.	0,05	0,040	137	-	0	0,04	0,006	52,4	600	100	0,031	0,005	0,00031	11,1	150	0,025	0,006	0,0018	149,0	0,00042	33,3	18,5
	макс.	0,17	0,072	218	-	65	0,066	0,018	100	1100	800	0,051	0,006	0,00117	32,8	179	0,035	0,012	0,0025	170,7	0,00100	51,7	30,1
сред.	0,11	0,053	163	-	22	0,051	0,009	68,7	795	430	0,039	0,005	0,00077	23,6	165	0,03	0,008	0,0021	155,7	0,00070	41,1	24,1	
S235J2G3, B/A	сравнительные 16 плавок																						
	мин.	0,09	0,041	-	97	0	0,04	0,005	38,8	400	100	0,031	0,005	0,00016	7,5	148	0,023	0,005	0,0015	142,8	0,00031	25,0	14,1
	макс.	0,16	0,069	-	100	65	0,065	0,011	88,0	1100	950	0,048	0,011	0,00138	38,6	200	0,042	0,011	0,0021	164,6	0,00111	56,9	26,9
сред.	0,12	0,051	-	99	22	0,049	0,008	63,4	763	456	0,038	0,006	0,00056	20,6	173	0,03	0,008	0,0018	156,3	0,00053	37,2	19,2	

Содержание кислорода в металле опытных и сравнительных плавов*

Вид плавов, марка стали	Содержание кислорода, ppm					
	мартенов- ская печь	обработка на УКП			разливка на УНРС	
		начало	середина	конец	начало	конец
Опытные, S235JR	<u>214-322</u> 280	<u>38-68</u> 50	<u>34-52</u> 44	<u>28-40</u> 38	<u>34-45</u> 40	<u>36-46</u> 40
Сравнительные (S235JR, 3сп) с Al катанкой и 45%-ным FeSi	<u>222-356</u> 277	<u>39-70</u> 51	<u>36-56</u> 46	<u>36-38</u> 31	<u>35-44</u> 41	<u>37-48</u> 43
Сравнительные (S235JR, 3сп) с вторичным Al на выпуске и 65%-ным FeSi	<u>236-270</u> 253	<u>42-84</u> 66	<u>37-82</u> 50	<u>10-79</u> 51	<u>34-66</u> 50	<u>38-80</u> 57

*Пробы взяты после ввода Al катанки, AlCa проволоки

Таблица 5

Характеристика шлака до (1) и после (2, 3, 4) ввода алюмокальциевой порошковой проволоки

Номер плавки, марка стали	Расход проволоки, м	Номер пробы	Химический состав шлака до и после ввода ПП, %								
			SiO ₂	CaO	B	MgO	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	S
80648, S235JR	220	1	26,5	44,9	1,69	10,8	3,68	4,3	0,48	8,9	0,20
		2	26,5	55,7	2,10	8,0	1,81	2,3	0,03	6,9	0,23
		3	22,8	50,6	2,22	9,2	1,37	1,2	0,31	11,2	0,46
		4	23,2	49,6	2,14	9,3	1,00	1,2	0,05	12,9	0,63
40643, S235JR	139	1	26,6	43,7	1,64	12,1	2,56	1,8	1,66	8,16	0,19
		2	27,3	45,7	1,66	12,0	1,72	1,6	0,89	8,08	0,26
		3	25,0	46,8	1,87	11,5	1,39	1,2	0,65	9,42	0,42
		4	24,1	49,4	2,05	10,1	1,12	1,2	0,13	9,30	0,56

снижается уровень окислов железа (к примеру, содержание FeO снижается на 0,2-2,0 % абс. и зависит от количества вводимой проволоки) и повышается содержание серы в шлаке на 15,0-36,8 % отн., что свидетельствует об активной десульфурации металла.

Более низкая окисленность металла и шлака на опытных плавках предопределила снижение расхода алюмофлюса для раскисления шлака и увеличения скорости и степени десульфурации металла.

Металлографические исследования. Выполнены исследования образцов литого и катаного металла от опытных и сравнительных плавов стали марок S235JR и 09Г2С. Для испытаний на разных стадиях производства (доводка на УКП и разливки на УНРС) отобрали 36 проб литого металла и 2 пробы листового проката (прокатный цех). Определен полный химический состав металла, в том числе содержание алюминия общего и кислоторастворимого, а также содержание газов по всему технологическому циклу.

Металлографические исследования по изучению внутренней структуры металла выполнены в следующем объеме: выполнена оценка неметаллических включений; исследована дендритная и действительная микроструктура.

Неметаллические включения. Результаты изучения неметаллических включений (количество и размер) приведены в табл. 6. Вид неметаллических включений в металле литых проб на одной из опытных плавов в различные периоды доводки на УКП и разливки на УНРС представлен на рис. 1.

Полученные данные показывают, что эндогенная неметаллическая фаза в металле всех литых проб представлена кислородными включениями сложного состава, различного размера и количества. Они в основном рассредоточены по сечению, имеют глобулярную форму и сложный состав, различный цвет и свечение в темном поле. По металлографическим признакам они соответствуют составу RO, RO₂ и R₂O₃ в различных соотношениях.

Сульфиды в литом металле не обнаружены. По видимому, высокоосновные известковоглиноземистые соединения продуктов раскисления хорошо ассимилировали (поглотили) серу и сульфиды перед удалением из ванны.

Важно отметить, что на начальной стадии обработки в металле опытных и сравнительных плавов количество включений разное (табл. 6). Вместе с тем после ввода порошковой проволоки с алюмокальцием интенсивность их удаления высокая. Степень удаления на опытных плавках при сравнении количества неметаллических включений находится в пределах 51,7÷83,5 %, тогда как на сравнительной плавке (после ввода только алюминия) количество включений даже несколько возросло. В конечном итоге количество неметаллических включений за период доводки (начало обработки – начало разливки на УНРС) на опытных плавках снижается на 61,5÷94,7 %, на сравнительной плавке – на 53,8.

Показательными могут служить данные об удалении включений малого размера (до 0,02 мм) в

Количество и размер глобулярных кислородных включений, выявленных в образцах литого металла

Номер пробы	Место отбора пробы	Диаметр включений, мм																	Σ
		до 0,02	0,03-0,04	0,04-0,05	0,05-0,06	0,06-0,07	0,07-0,08	0,08-0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,2	0,3	0,4	0,7	0,8	
плавка 50675, S235JR																			
1	перед AlCa	22	8	3	3	2	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	39
2	после AlCa	3	3	3	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	11
3	перед SiCa	3	4	1	2	–	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	11
4	после SiCa	11	6	2	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	20
5	промоквш 20 м	6	8	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15
6	промоквш 100 м	4	2	4	4	3	–	2	1	–	–	1	1	1	–	–	1	–	24
плавка 40639, S235JR																			
1	перед AlCa	13	26	13	21	1	1	1	2	3	2	2	1	2	1	1	–	–	90
2	после AlCa	8	6	7	7	3	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	32
3	перед SiCa	1	2	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5
4	после SiCa	3	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5
5	промоквш 20 м	4	3	1	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10
6	промоквш 100 м	5	5	7	5	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	23
плавка 80648, S235JR																			
1	перед AlCa	138	109	46	23	6	3	1	2	1	1	1	–	–	–	–	–	–	331
2	после AlCa	48	27	15	36	6	7	3	6	4	1	1	1	3	–	1	–	1	160
3	перед SiCa	16	12	2	4	–	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	38
4	после SiCa	5	2	4	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	12
5	промоквш 20 м	5	3	1	1	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	11
6	промоквш 100 м	2	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	5
плавка 70810, S235JR																			
1	перед AlCa	179	93	29	10	1	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	313
2	после AlCa	56	27	8	3	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	95
3	перед SiCa	35	13	6	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	56
4	после SiCa	7	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10
5	промоквш 20 м	5	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7
7	промоквш 100 м	8	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	10
плавка 40773, S235JR																			
1	перед AlCa	10	6	6	3	2	–	–	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	28
2	после AlCa	9	8	5	7	–	–	–	1	–	–	1	–	–	–	–	–	–	31
3	перед SiCa	3	3	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	7
4	после SiCa	6	4	1	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	13
5	промоквш 20 м	4	4	2	1	–	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	13
7	промоквш 100 м	4	2	1	2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	9
плавка 30759, 09Г2С																			
1	перед AlCa	289	96	34	24	6	3	–	–	–	–	1	1	1	–	–	–	–	455
2	после AlCa	40	21	9	5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	75
3	перед SiCa	51	14	4	1	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	72
4	после SiCa	19	4	3	1	–	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	28
5	промоквш 20 м	13	7	1	2	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	24
7	промоквш 100 м	13	1	–	1	–	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	16

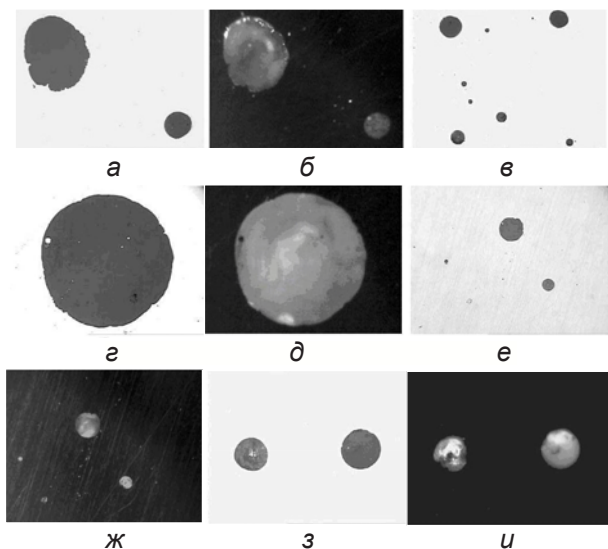


Рис. 1. Вид эндогенных неметаллических включений в металле литых проб плавки 80648 (масштаб 1:0,5): после введения AlCa, проба № 2, светлое поле (а), $\times 100$; после введения AlCa, проба № 2, темное поле (б), $\times 100$; после введения AlCa, проба № 3, светлое поле (в), $\times 100$; перед введением SiCa, проба № 3, светлое поле (г), $\times 100$; перед введением SiCa, проба № 3, темное поле (д), $\times 200$; после введения SiCa, проба № 4, светлое поле (е), $\times 200$; после введения SiCa, проба № 4, темное поле (ж), $\times 200$; после введения SiCa, проба № 4, светлое поле (з), $\times 400$; после введения SiCa, проба № 4, темное поле (и), $\times 400$

начальный период обработки после ввода смеси алюминия и кальция (табл. 6). На опытных плавках количество неметаллических включений снижается на $38,5\div 86,4\%$, на сравнительной – на $10,0$.

В качестве примера характерной динамики изменения количества, формы и размеров неметаллических включений на опытных плавках можно привести данные металлографических исследований по плавкам № 40639 (S235JR) и 30759 (09Г2С).

Плавка 40639, S235JR. На начальном этапе (проба до ввода ПП с наполнителем из алюминия и кальция) металл загрязнен включениями, расположенными неравномерно в виде скоплений. После присадки ПП распределение включений стало равномерным, их количество сократилось почти в 3 раза, уменьшился их размер, то есть на данном этапе произошло удаление нерастворимых окислов, выделяющихся при сравнительно быстром затвердевании металла. При этом кальций предотвратил появление скоплений глинозема, образующихся при раскислении алюминия.

В пробе перед вводом SiCa кислородные включения были единичными, размером до $0,06$ мм, что, вероятно, связано с дальнейшим удалением продуктов раскисления. После ввода SiCa их размер уменьшился до $0,04$ мм. Это произошло благодаря ускорению достижения равновесия и полноте протекания процессов раскисления. Включения имеют вид округлых многофазных соединений серого цвета, слабо прозрачных в темном поле, с внедренными светлыми участками закиси железа.

Плавка 30759, 09Г2С. В пробе перед вводом AlCa присутствует множество включений, в основном размером (мм) до $0,04$, реже $0,05-0,08$ и единичные – $0,14-0,2$. В пробе после ввода AlCa количе-

ство включений резко уменьшилось и сохранилось на том же уровне в пробе перед вводом SiCa. После ввода SiCa количество включений уменьшилось и изменился состав, о чем свидетельствует различная степень свечения в темном поле.

Они представляют собой резко очерченные глобулы с кольцевыми отсветами, прозрачные в темном поле. Так как при формировании кислородных включений в стали, легированной марганцем, образуются железомарганцевые силикаты, то в состав включений, по-видимому, дополнительно входят закиси этих компонентов (железа и марганца). В пробе металла из промковша в начале разливки количество включений незначительно уменьшилось. В пробе металла из промковша в конце разливки включений немного, некоторые из них – со светящейся оторочкой в темном поле.

Микроструктура

Дендритная структура литых проб состоит из простых дендритов и межосных участков. При дендритной форме кристаллов характерна избирательная кристаллизация металла, то есть состав дендритов отличается от состава межосных участков содержанием примесей. Распределение примесей на границе кристалл-жидкость (кроме теплофизических параметров процесса – величины переохлаждения, градиента температур, скорости кристаллизации) определяет форму кристаллов. Поэтому дендритное строение в пробах отличается плотностью расположения, величиной осей и межосных участков.

Наиболее характерное формирование дендритной структуры для опытных плавков с использованием алюмокальциевой проволоки наблюдается на плавках № 80648 (S235) и 30759 (09Г2С) (рис. 2, 3).

Плавка № 80648, (S235JR). На начальном этапе перед вводом AlCa дендриты простые, среднего размера, глобулярной и слегка удлиненной формы. После ввода AlCa увеличилась площадь, занятая межосными участками. Перед вводом SiCa произошел рост дендритных осей при неизменной дисперсности, а после его ввода соотношение объемов, занимаемых дендритами и межосными

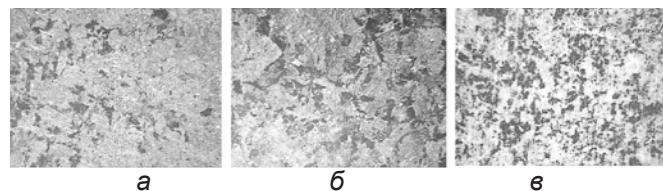


Рис. 2. Дендритная структура литых проб плавки 80648, $\times 50$ (масштаб 1:0,5): проба перед введением AlCa (а); после введения AlCa (б); проба из промковша (в)

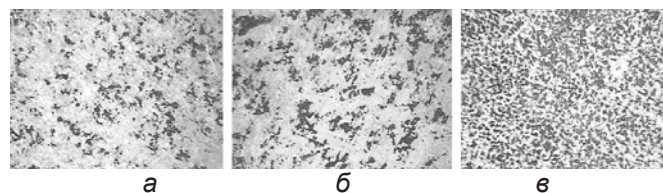


Рис. 3. Дендритная структура литых проб плавки 30759, $\times 50$ (масштаб 1:0,5): проба перед введением AlCa (а); после введения AlCa (б); проба из промковша (в)

участками, стабилизировалось на уровне 50:50. В пробах из промковша УНРС структура равномерная по сечению, с высокой степенью дисперсности.

Плавка 30759, 09Г2С. До ввода AlCa дендритная структура состоит из большого количества мелких дендритов и межосных объемов. Образованию такой дисперсной структуры на начальном этапе способствовали многочисленные центры кристаллизации в виде неметаллических включений.

В пробе после ввода AlCa дендриты стали более тонкие, межосные участки увеличились и занимают большую площадь, чем оси. В пробе перед вводом SiCa оси дендритов утолщились. После ввода SiCa с увеличением концентрации вводимого компонента возросло количество центров кристаллизации, в результате увеличились плотность и величина осей, расположенных равномерно по сечению. В пробах из промковша УНРС получена равномерная структура.

Дендритная структура разрывных образцов листового проката дисперсная, в осевой зоне наблюдаются короткие прерывистые светлотравящиеся ликвационные полосы.

Действительная структура литого металла всех проб состоит из продуктов распада аустенита – преимущественно из верхнего бейнита с ферритной сеткой, выпавшей по границам бывшего крупного аустенитного зерна.

Подытоживая результаты металлографических исследований металла опытных и сравнительных плавков, следует отметить следующее. В характере формирования дендритной структуры прослеживаются определенные закономерности: оси дендритов небольшого размера, распределенные неравномерно по сечению и занимающие объем примерно 20 %, по ходу плавки несколько увеличиваются в размерах и располагаются равномерно; увеличивается площадь, занятая межосными участками. Соотношение объемов, занимаемых дендритными и межосными участками, стабилизируется на уровне 50:50, что позволяет сделать вывод о наличии модифицирующего действия кальция на процесс кристаллизации при вводе AlCa и SiCa. По-видимому, оно проявляется в торможении роста дендритного скелета в результате его адсорбции на поверхности растущих дендритов. При этом оставшаяся часть жидкости кристаллизуется в межосных участках. Увеличение ее объема уже после раннего ввода лигатуры Al+Ca должно приводить к тому, что все элементы, имеющие прямую ликвацию, будут распределяться в большем объеме, что должно обеспечить снижение их концентрации в межосных участках, уменьшение дендритной ликвации и получение плотной дисперсной структуры, которому также способствует рост количества центров кристаллизации за счет увеличения концентрации вводимых компонентов. Такая структура обладает низкой степенью макро- и зональной микросегрегации и, как результат, приводит к улучшению механических характеристик металла.

Действительная структура литого металла всех проб представлена структурами неполной закалки, в основном верхним бейнитом и ферритной сеткой, полученными по механизму промежуточного превращения.

Анализ свойств и качества поверхности листового проката

Для оценки влияния новой технологии на уровень механических свойств и качество поверхности листового проката выполнили сопоставительный анализ результатов испытаний, а также величин отсортровки по поверхностным дефектам, большой, малой и общей зачистки листового проката из опытного и сравнительного металла, близкого по содержанию основных легирующих элементов. Результаты приведены в табл. 7.

Представленные данные показывают, что средний уровень предела текучести и временного сопротивления листового проката из опытных плавков превышает эти характеристики для проката из сравнительных плавков. К примеру, для стали марки 09Г2С предел текучести (σ_T) в среднем выше на 7,5 Н/мм², временное сопротивление (σ_B) – на 5,7. При этом относительное удлинение (δ_5) остается практически на прежнем уровне. Ударная вязкость KCU+20 и KCU-40 увеличивается на 4,6 и 2,5 Дж/см² соответственно. Для листового проката из стали марки S235JR прирост прочностных свойств на опытных плавках по сравнению с плавками, обработанными по обычной технологии, несколько меньше, чем для листового проката из опытных плавков стали марки 09Г2С. Наблюдается также тенденция к повышению относительного удлинения и работы удара KV+20.

Качество поверхности листового проката также улучшается: в целом уменьшается уровень общей зачистки и отсортровка по дефектам поверхности, связанным с качеством металла.

Выводы

Разработана и испытана технология рафинирования и раскисления металла в начальной стадии доводки на У КП порошковой проволокой с наполнителем из смеси гранулированного алюминия и металлического кальция, обеспечивающая раннее формирование внутренней структуры литого металла.

Ввод в металл лигатуры из сильных раскисляющих элементов (алюминий + кальций) и модификатора (кальций) в начале доводки на У КП на опытных плавках обеспечивает снижение окисленности металла и шлака, увеличение степени усвоения алюминия из алюмокальциевой проволоки по сравнению с усвоением из алюминиевой катанки и из чушкового алюминия, увеличение скорости и степени десульфурации металла как по ходу, так и за весь период обработки, повышение степени усвоения кальция из порошковой проволоки с силикокальцием для модифицирования стали и снижение ее расхода.

Металлографические исследования показали, что ввод в металл раскисляюще-модифицирующей лигатуры (алюминий + кальций) на ранней стадии доводки позволяет изменять внутреннюю структуру металла:

– количество неметаллических включений после ввода Al+Ca уменьшается в 2+6 раз, степень удаления достигает 83,5 %. Положительная динамика уменьшения количества включений сохраняется до конечного продукта;

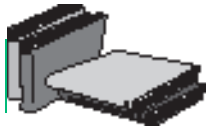
Механические свойства и качество поверхности листового проката из опытного и сравнительного металла

Марка	Технология обработки плавок	Результаты механических испытаний							Качество поверхности листового проката								
		тип величины	предел текучести, σ_T , Н/мм ²	временное сопротивление, σ_B , Н/мм ²	относительное удлинение, δ_5 , %	работа удара, KV+20, Дж	ударная вязкость, Дж/см ²		прокатанов	отсортировка из-за качества металла		зачистка					
							КСУ+20	КСУ-40		шт	%	шт	%	шт	%	шт	%
S235JR	опытные с вводом проволоки AlCa 60/40	мин.	250	415	25	67	-	-	шт	шт	%	шт	%	шт	%		
		макс.	315	477	36	113	-	-	2154	27	1,25	359	16,67	266	12,4	625	29,0
		сред.	285,94	441,77	31,5	96	-	-									
	сравнительные (обычная технология)	мин.	265	410	24,5	72	-	-									
		макс.	320	480	36	104	-	-	3005	36	1,20	567	18,87	376	12,5	943	31,4
		сред.	285,87	438,68	29,9	92,45	-	-									
09Г2С	опытные с вводом проволоки AlCa 60/40	мин.	355	510	21,5	-	95	64									
		макс.	390	560	29	-	135	122	374	17	4,55	72	19,25	174	46,5	246	65,8
		сред.	372,5	535,0	25,2	-	114,1	89,7									
	сравнительные (обычная технология)	мин.	345	510	21,5	-	89	77									
		макс.	385	560	34	-	123	97	306	54	17,7	22	7,19	180	58,8	202	66,0
		сред.	364,95	529,3	25,6	-	112,1	86,2									
S235JR	опытные с вводом проволоки AlCa 70/30	мин.	265	425	26	87	-	-									
		макс.	325	470	33	109	-	-	956	8	0,84	184	19,25	100	10,5	284	29,7
		сред.	283,87	443,8	29,1	98,5	-	-									
	сравнительные (обычная технология)	мин.	250	424	26	61	-	-									
		макс.	320	455	35	118	-	-	1686	26	1,54	371	22,00	248	14,7	619	36,7
		сред.	280,57	442,94	31,5	98,83	-	-									

– формирование дендритной структуры после ввода Al+Ca, а затем и SiCa протекает с увеличением площади межосных участков. Соотношение объемов, занимаемых дендритными и межосными участками, стабилизируется на уровне 50:50, что позволяет сделать вывод о наличии модифицирующего действия кальция на процесс кристаллизации;

– увеличение объема кристаллизующейся жидкости в межосных участках уже после раннего ввода лигатуры Al+Ca должно приводить к тому, что все

элементы, имеющие прямую ликвацию, будут распределяться в большем объеме, что должно обеспечить снижение их концентрации в межосных участках, уменьшение дендритной ликвации и получение плотной дисперсной структуры, которому также способствует рост количества центров кристаллизации за счет увеличения концентрации вводимых компонентов. Такая структура обладает низкой степенью макро- и зональной микросегрегации, благодаря чему улучшаются механические характеристики металла.



ЛИТЕРАТУРА

1. Внепечная обработка расплава порошковыми проволоками / Д. А. Дюдкин, С. Ю. Бать, С. Е. Гринберг и др. – Донецк: Юго-Восток, 2003. – 306 с.
2. Бор, кальций, ниобий и цирконий в чугунах и сталях. – М.: ГНТИ, 1964. – 459 с.
3. Ицкович Г. М. Влияние легирующих и микролегирующих добавок на неметаллические включения в сталях / Теория металлургических процессов. (Итоги науки и техники). – М.: ВИНТИ, 1987. – Т. 6. – С. 68-168.
4. Поволоцкий Д. Я., Кудрин В. А., Вишкареев А. Ф. Внепечная обработка стали. – М.: Металлургия, 1995. – 255 с.
5. Совершенствование технологии раскисления стали / Б. П. Крикунов, Н. М. Переворочаев, В. И. Цуканов и др. // Металл и литье Украины. – 2009. – № 1-2. – С. 26.

Анотація

Переворочаєв М. М., Крикунов Б. П.

Технологія спрямованого формування внутрішньої структури литого металу

Розроблено та випробувано технологію рафінування і доведення на УВП порошковим дротом з наповнювачем із суміші гранульованого алюмінію та металевих кальцію. Технологія забезпечує: раннє формування внутрішньої структури литого металу із зниженням у 2-6 разів кількості неметалевих включень і утворенням дендритної структури із збільшенням площі міжвісних ділянок та об'єму рідини, що в них утворюється; покращення технологічних показників доведення сталі (зниження окисленості металу та шлаку, збільшення швидкості та ступеня десульфурації металу).

Ключові слова

внутрішня структура, литий метал, неметалеві включення, порошковий дріт, алюмокальцієвий наповнювач, розкислення, дендритна структура, міжвісні ділянки

Summary

Perevorotchaev N., Krikunov B.

Technology of directed forming of cast metal internal structure

Technology of metal refining and deoxidation with powder-cored wire containing a mixture of granulated aluminum and calcium metal has been developed and tested. The processing occurred at the initial stage of ladle furnace finishing treatment. The technology secures early formation of the cast metal internal structure with 2-6 fold reduction in the quantity of non-metallic inclusions, dendritic structure with enlargement of interaxial space and liquid volumes, crystallizing in it; improvement of ladle furnace processability indexes of steel finishing (decreasing of the metal and slag oxidation level, increasing of the rate and extent of desulfurization).

Keywords

internal structure, cast metal, non-metallic inclusions, powder-cored wire, aluminocalcium filler, deoxidation, dendritic structure, interaxial space